第40卷 第3期
2023年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 3
Mar. 2023

树轮记录的吕梁山北段1923年以来3—4月平均最高气温变化

王嘉川[1,2]， 李书恒[1,2]， 郭伊利[1,2]， 韩宜洁[1,2]， 毛忠雷[1,2]

（1. 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127；2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127）

摘 要：基于吕梁山北段管涔山地区华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）样芯资料，建立树轮宽度标准年表（STD），利用Pearson相关分析方法得出3—4月平均最高气温是研究区树木径向生长的主控气候因子（R=0.509，P<0.05）。借助一阶线性回归方程模拟构建近百年来管涔山地区3—4月平均最高气温的变化过程，同时应用逐一剔除法对重建方程进行交叉检验，验证回归方程的稳定性和可靠性。对重建气温序列温度变化分析可知，管涔山地区过去近百年有两个暖期和三个冷期分布，暖期为1932—1945年和1957—1970年；冷期为1946—1956年，1971—1983年和1993—2010年。基于Morlet小波分析对重建气温序列周期分析可知，存在3~5 a、10~13 a、22~33 a、40~45 a的周期分布特征，厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-Southern Oscillation，ENSO）现象和太阳黑子活动是其周期变化驱动因子。大尺度空间相关分析可知，重建气温序列对俄罗斯中东部、日本北部、中国中东部等大范围地区的温度变化具有很好的空间代表性。研究结果进一步补充和丰富管涔山地区气候资料，同时对森林管理及农牧业发展具有重要的参考意义。

关键词：华北落叶松；树轮宽度；平均最高气温重建；管涔山

气候变化衍生问题与人类生存息息相关，19世纪80年代以来地表温度升温幅度高达1.5 ℃左右，20世纪中期以后，大气CO^2含量升高约100ppm之多，气候变暖对地表生态环境影响深远，对人类生存环境带来诸多挑战[1-6]。了解过去气候动态进程对于系统科学掌握气候变化规律和预测未来气候变化趋势具有重要意义。植被作为地表生态系统中对气候响应最为敏感的指示物之一，可以精确记录气候变化的历史进程。北半球中高纬地区树木（针叶林树种）年轮具有分布范围广，定年准确，连续性强，时空分辨率高，样本易获得等天然优势，成为现代许多学者研究历史气候变化进程的主要代用指标之一[7-8]。

气象站器测数据由于不同区域站点分布情况各异，气象数据时间短，部分年限数据缺失，限制对当地长时间尺度历史气候变化的认识。树木年轮气候学结合气象站器测数据和树轮宽度数据资料，通过重建历史气候因子变化情形，扩宽对以往长时间尺度气候变化的认识。近年来树木年轮气候学领域重建历史时期气温变化发展迅速，中高纬区域高大山脉均开展一系列针对针叶林树种的响应和重建研究。西欧阿尔卑斯山[9]、东亚南部喜马拉雅山[10]、西班牙东南部内华达山[11]、北美东部阿巴拉契亚山[12]、西亚高加索山脉[13]等地区，均开展基于树木年轮重建气温的研究。在我国同样开展大量重建历史气温的研究，具体区域分布于新疆阿尔泰山[14]、陕西秦岭[15]、青海祁连山[16]、河南桐柏山[17]、湖北大别山[18]、四川横断山[19]等区域，大大丰富我国基于树木年轮重建长时间尺度气温研究。

管涔山地区位于温带季风和温带大陆性气候，半湿润区和半干旱区分界线上，处于中西部地区气候过渡地带，当地树木生长对气候响应敏感，适合

收稿日期：2022-06-27； **修订日期：**2022-11-25
基金项目：黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目（SKLLQG1611）；陕西省自然科学基金项目（2014JQ5172）
作者简介：王嘉川（1996-），男，硕士研究生，主要从事树木年轮气候学研究. E-mail: jiachuanwang2020@163.com
通讯作者：李书恒. E-mail: lish@nwu.edu.cn

于树木年轮气候学研究。在本文研究区域附近，蔡秋芳等[20]基于吕梁山中段油松样本重建过去150 a左右5—7月平均气温变化，探究不同冷暖期时段分区与北方大范围同期气温变化响应关系；王振威等[21]基于吕梁山北段油松样本重建过去150 a左右5—6月帕尔默干旱指数变化，得出整个区域干旱指数变化有周期和干湿分期现象；李强等[22]基于吕梁山北段油松样本重建过去300 a左右全年降水变化，得出该区域降水年纪分配不均匀，有明显的周期现象。在山西吕梁山区域树木年轮气候学研究主要集中于油松的研究，同时针对于树轮宽度的响应与气温重建研究比较缺乏。

本文基于吕梁山北段管涔山林线处优势针叶林树种华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)树轮宽度样芯资料，建立标准年表，分析年表与各月不同时间段气候因子的响应关系，揭示控制当地树木生长的主要气候因子，重建过去近百年3—4月平均最高气温变化，分析长时间尺度下冷暖期交替、空间代表性、周期变化等特征。在气候变暖背景下，针对月际尺度的平均最高气温重建研究，可以明确指示历史时期当地气温阈值变化范围，为应对未来气候变化提供借鉴和指示。本文研究结果，一定程度上延长器测气候资料，丰富我国中西部地区树木年轮宽度数据，对于预测未来管涔山地区气温变化有重要作用，对于指导当地农林牧业发展具有重要的参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

管涔山地区隶属于山西省西部山脉吕梁山北支(图1)，区域内多年平均降水量为390.82 mm，多年月平均气温为6.33 ℃，多年月平均相对湿度为56.18%，月最低气温可达−19.06 ℃，月最高气温达27.25 ℃(图2)，区域四季分明，气温年差较大。夏季受暖湿的东南季风控制，炎热多雨；冬季受干冷的西北风控制，严寒干燥。管涔山地区植被茂密，主要针叶林树种有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、白杄(*Picea meyeri*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等，主要灌木有刺梅(*Thorn plum*)、沙棘(*Sea buckthorn*)等。土壤以亚高山草甸土、棕壤、淋溶褐土、栗褐土为主[23-24]。

1.2 气象资料

研究区气象资料来源于国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn)。气象站点选取距离采样点综合距离最近的4个气象站，分别为宁武站(39°00′N，112°18′E，海拔1437.4 m)，五寨站(38°55′N，111°49′E，海拔1401.0 m)，岢岚站(38°43′N，111°35′E，海拔1396.7 m)，静乐站(38°21′N，111°56′E，海拔1212.2 m)。研究中气象数据具体指标值均为4个气象站点数据的平均值。该区域4个气象站点的气候资料时间尺度为1970—2020年，已有研究表明该区域

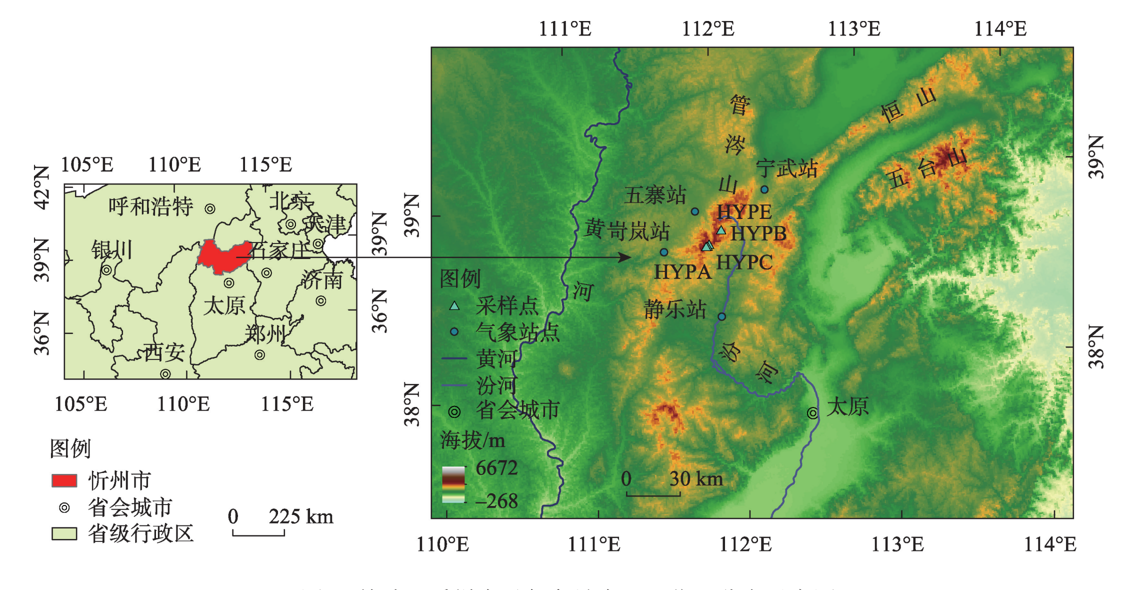


图1 管涔山采样点及气象站点地理位置分布示意图

Fig. 1 Locations of the tree-ring sampling points and weather stations on Guancen Mountain

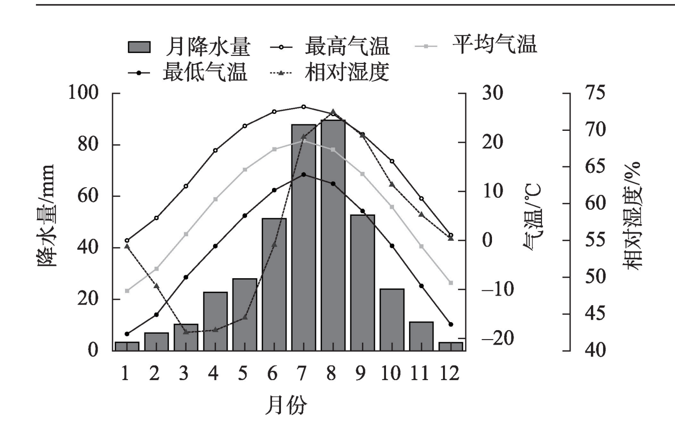


图2　1996—2020年4个气象站多年月气温、降水、相对湿度均值变化

Fig. 2　Changes in the mean monthly temperature, precipitation and relative humidity of four weather stations over the years from 1996 to 2020

存在气温突变现象，气温突变点为1995—1996年时段内[25]。在确保气候资料时间尺度符合树木年轮气候学研究标准前提下，为保证宽度年表与气候因子相关性水平更高，研究中选用的气象数据为1996—2020年的月降水量、月平均气温、月最高气温、月最低气温和月相对湿度5个气候指标。考虑到树木径向生长对气候因子响应的“滞后现象”，树木径向生长不仅受当年生长季气候因子的影响，上一年生长季后期气候因子同样影响当年树木的生长发育[15,17-18]。基于我国北方针叶林树种的生长情况，选择上一年9月到当年12月共计16个月的气象指标进行树轮宽度年表与气候因子的相关分析研究。

1.3　样本采集与年表建立

2021年7月在管涔山最高峰荷叶坪（2783 m）林线区域附近，选择3个不同样点采集华北落叶松树芯样本资料，在海拔2303 m（HYPA样点）采集24棵树48根样芯，在海拔2477 m（HYPB样点）和海拔2539 m（HYPC样点）分别采集23棵树46根样芯。同时在管涔山国家森林公园（HYPE样点，海拔2128 m）采集28棵树56根样芯。采样中遵循同一棵树在胸径和基径位置各采集一根样芯资料，其一方便同一棵树样本信息的对照，再者丰富样本量的同时提升整体样本数据的准确性。在采样过程中，基于国际树木年轮数据库（International Tree-Ring Date Bank，ITRDB）的标准，选择树龄长，生长健康，树木长势好的华北落叶松，利用内径为5.15 mm的生长锥进行样芯的采集，同时确保生长锥每次采样均通过树木髓心位置，为日后样芯的交叉定年，年表的制作提供可信度更高的数据源[8]。将所采集的样芯单根单筒放于提前编号的纸筒内，防止样芯资料的混淆与损坏。本次采样一共收集98棵树196根样芯资料，采样树木胸径在35.62~48.90 cm。

在实验室按照Stokes和Smiley基本方法对样芯进行有序的拆分和预处理工作[26]，样芯安置于木槽中，依次用320目、600目、800目砂纸进行打磨，直至样芯年轮年纪变化清晰可见，在双筒显微镜下用骨架图法进行目视交叉定年，确定样芯生长年限范围。之后用精度为0.001 mm的LINTAB™ 6年轮宽度测量仪（Rinntech，Heidelberg，Germany）逐年测量年轮宽度，采用COFECHA程序（Holmes，1983）对定年和测量结果进行质量检验，剔除定年错误或误差较大的样芯[27]。最后使用ARSTAN程序（Cook，1986）中的线性函数和负指数函数拟合树木生长趋势，消除非气候因素和树木生长趋势的影响，通过双权重平均法进行年轮曲线的标准化[28]，最终建立标准年表（Standard Chronology，STD）、差值年表（Residual Chronology，RES）和自回归年表（Arstan Chronology，ARS）3种类型的年表。建立年表过程中，剔除掉26根拟合树木生长趋势差的样芯，剩余170根样芯统一建立年表。本文基于年表参数以及标准年表保留更多气候变化低频信号信息，选择标准年表（图3）进行气温重建分析[8,29]。

1.4　研究方法

利用SPSS软件中Pearson相关分析计算华北落叶松树轮宽度指数年表与各月和特殊月份组合气

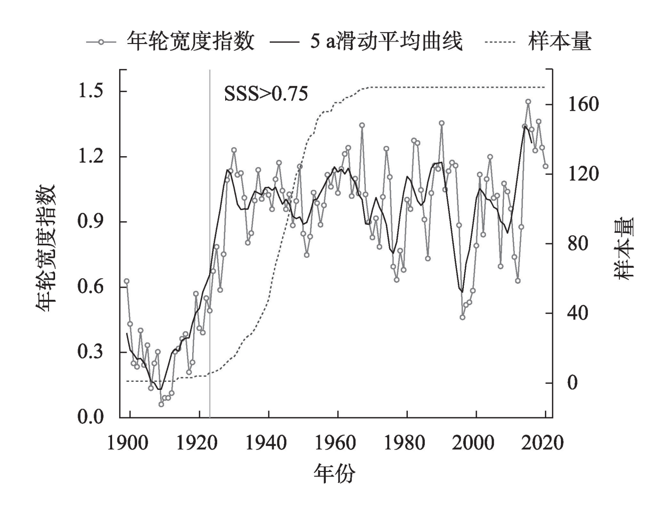


图3　管涔山华北落叶松树轮宽度标准年表和样本量

Fig. 3　Standard chronology and sample sizes of the annual tree-ring widths of *Larix principis-rupprechtii* trees on Guancen Mountain

候因子(月平均气温、月最低气温、月最高气温、月降水量、月相对湿度)的相关关系,以确定影响研究区树轮宽度径向生长的主要气候因子。利用一阶线性回归模型构建气温重建方程,利用逐一剔除法对重建方程进行交叉检验以确定方程的稳定性和可靠性[8]。计算重建方程的气温均值与标准差,对研究区过去长时间气温变化进行高温年、寒冷年、偏暖年、偏冷年、冷期、暖期划分[14]。将气温大于$T_{mean}+2\sigma$(18.01 ℃)的年份定义为高温年;将气温介于$T_{mean}+\sigma$(16.43 ℃)和$T_{mean}+2\sigma$(18.01 ℃)的年份定义为偏暖年;将气温介于$T_{mean}-\sigma$(13.28 ℃)和$T_{mean}+\sigma$(16.43 ℃)的年份定义为正常年;将气温介于$T_{mean}-2\sigma$(11.71 ℃)和$T_{mean}-\sigma$(13.28 ℃)的年份定义为偏冷年;将气温小于$T_{mean}-2\sigma$(11.71 ℃)的年份定义为寒冷年[14,30]。为进一步分析管涔山地区3—4月平均最高气温的年代际变化特征,对重建气温序列进行11 a滑动平均,按照气温重建序列连续11 a大于或等于T_{mean}(14.86 ℃)划分为暖期,连续11 a小于T_{mean}划分为冷 期[14,18]。利用Matlab软件对重建气温序列进行Morlet小波分析,以探究气温变化是否存在周期现象[15]。利用荷兰皇家气象研究所数据共享网站(http://www.climexp.knmi.nl),对气温重建序列进行空间代表性分析。

2 结果与分析

2.1 年表特征分析

由采样点华北落叶松树轮宽度标准年表信息可知,平均敏感度为0.213,信噪比高达30.299,说明采样点标准年表保留有丰富的气候信息。标准差为0.302,序列间、树木内、树木间有较高的平均相关系数,表明采样点年表有较好的区域一致性,可以代表当地华北落叶松生长情形。一阶自相关系数为0.683,表明当年树木径向生长受前一年气候条件的影响和制约[8]。样本总体解释量高达0.936,远远超过0.85的阈值界限[31],表明样芯能代表该区域内华北落叶松树轮宽度变化的基本特征。通过分析华北落叶松样本统计参数可知,所建立的树轮宽度标准年表适合树木年轮气候学分析。重建气温的起始年份,以子样本信号强度SSS(Sub-sample Signal Strength)来确定[31],为尽可能的延长重建气温时间长度,选取SSS阈值为0.75[15],结合年表参数值,得出可信年表时间尺度为1923—2020年(表1)。

2.2 树木径向生长与气候因子的相关关系

考虑到气候因子对树木径向生长的滞后效应,选择上一年9月至当年12月的月平均气温、月最低气温、月最高气温、月降水量、月相对湿度气候因子与树轮宽度标准年表做Pearson相关分析(图4)。结果表明,树轮宽度指数年表与绝大部分月份降水量相关性不显著,只与当年3月降水量呈显著负相关关系(R=−0.364,P<0.05)。树轮宽度指数年表与当年1月(R=0.429,P<0.05)、3月(R=0.537,P<0.05)、4月(R=0.447,P<0.05)、5月(R=0.407,P<0.05)、10月(R=0.446,P<0.05)的月最高气温呈显著正相关关系,与3月平均气温(R=0.433,P<0.05)和6月最低气温(R=0.414,P<0.05)呈显著正相关关系。Pearson相关性分析可知,管涔山地区华北落叶松径向生长主要受月最高气温限制,通过组合月份相关性分析可知,树轮宽度指数年表与3—4月平均最高气温呈显著正相关关系(R=0.509,P<0.05),3—4月平均最高气温为限制当地优势种华北落叶松径向生长的最主要气候因子。

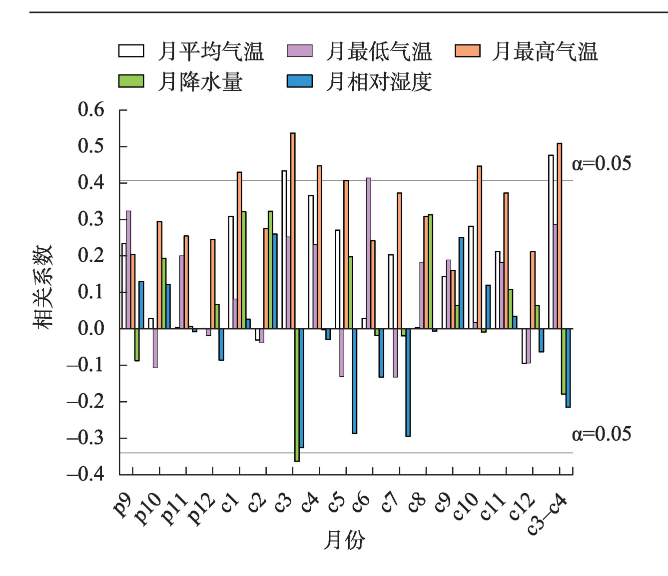
2.3 过去近百年3—4月平均最高气温重建与检验

基于Pearson相关分析结果,将管涔山地区华北

表1 管涔山华北落叶松采样点概况及树轮样本统计参数

Tab. 1 Sampling points and statistical parameters of tree-ring samples of *Larix principis-rupprechtii* trees on Guancen Mountain

特征参数	统计值	特征参数	统计值
采样点海拔	2128~2539 m	序列间的平均相关系数 (R_1)	0.490
样本量(树/芯)	98/196	树木内的平均相关系数(R_2)	0.514
序列长度	1899—2020年	树木间的平均相关系数(R_3)	0.482
公共区间	1955—2020年	信噪比(SNR)	30.299
平均敏感度(MS)	0.213	样本总体解释量 (EPS)	0.936
标准差(SD)	0.302	一阶自相关系数(AC_1)	0.683
子样本信号强度SSS > 0.75起始年(样芯数)	1923年(6)		



注：p代表前一年；c代表当年。

图4　管涔山华北落叶松树轮宽度标准年表与气候因子的相关分析

Fig. 4　Correlation analysis of standard chronology of tree-ring width and climate factors of *Larix principis-rupprechtii* trees on Guancen Mountain

落叶松树轮宽度标准年表值作为自变量，3—4月平均最高气温作为因变量，采用线性回归方法构建管涔山地区气温重建方程：

$$T_{max3-4} = 7.4074 GC_{STD} + 7.5207$$

式中：T_{max3-4}为3—4月平均最高气温，GC_{STD}为管涔山华北落叶松树轮宽度标准年表值。

该重建方程的相关系数为0.51，可以解释该区域3—4月平均最高气温序列方差（R^2）的25.89%，调整自由度后的方差解释量（R^2_{adj}）为22.67%，F检验值为8.034，P<0.01。

重建方程的稳定性和可靠性直接影响到重建序列的质量，采用逐一剔除法对气温重建方程进行交叉检验，验证重建方程的稳定性和可靠性，各项检验统计量数值见表2。符号检验（ST）和威尔科克森符号秩检验（Wilcoxon ST）均达到了显著水平（P<0.01），说明3—4月平均最高气温重建序列与实测序列在高低频变化上有较好的一致性；误差缩减值（RE）是精确检验估计气候重建值可靠性的统计量，取值范围为[−∞，1]，数值小于或等于0表示重建结果不可信，大于0表示重建结果具有一定可靠性，越接近1表示重建结果越可靠[8]，本文RE为0.95，说明气候重建值通过检验；乘积平均数（t）可以双重考虑到估计预报量和实际预报量的符号及数量值，本文t值为3.00，通过显著性检验（P<0.01）。基于逐一剔除法对重建方程的交叉检验分析，重建管涔山地区3—4月平均最高气温方程通过了稳定性和可靠性检验。从图5可知，重建气温与实测气温值有很好的同步性。

2.4　重建气温序列波动变化特征

由图6可知，过去近百年来，管涔山地区3—4月平均最高气温动态波动明显，20世纪末期以来，气温整体呈波动上升趋势。重建的3—4月平均最高气温波动范围在10.94 ℃（1996年）~18.29 ℃（2015年），整体气温相差为7.35 ℃。在整个重建阶段，3—4月平均最高气温的平均值（T_{mean}）为14.86 ℃，标准差（σ）为1.57 ℃。

由图6可知，在过去近百年里，管涔山地区高温年出现1次，为2015年，占总年份的1.02%；寒冷年出现4次，分别为1923年、1996年、1997年、1998年，占总年份的4.08%；偏暖年与偏冷年均出现13次，分别占总年份的13.27%；正常年为67次，占总年份的68.36%。整个长时间尺度重建序列，正常年居多，表明管涔山地区3—4月平均最高气温波动变化稳定。

在过去近百年来，管涔山地区经历了两个暖期和三个冷期（表3）。两个暖期持续时间均为14 a，后一个暖期1957—1970年气温整体明显高于前一个暖期1932—1945年，后一个暖期期间气温更高，更炎热。冷期持续时间最长（1993—2010年）为18 a，同时也是冷期中气温最寒冷的阶段，气温距平值为−0.643 ℃；冷期持续时间最短（1946—1956年）为11 a，是冷期中相对温暖的阶段，气温距平值为−0.169 ℃；另外一个冷期（1971—1983年）持续时间

表2　逐一剔除法检验统计量

Tab. 2　Statistical characteristics of leave-one-out test

时段	r	R^2	R^2_{adj}	F	ST	Wilcoxon ST	RE	t
1996—2020年	0.51	25.89%	22.67%	8.04**	16+/9−**	16+/9−**	0.95	3.00**

注：r为相关系数；R^2为方差解释量；R^2_{adj}为调整自由度后的方差解释量；F为方差检验值；ST为符号检验；Wilcoxon ST为威尔科克森符号秩检验；RE为误差缩减值；t为乘积平均数；**代表99%的置信水平。

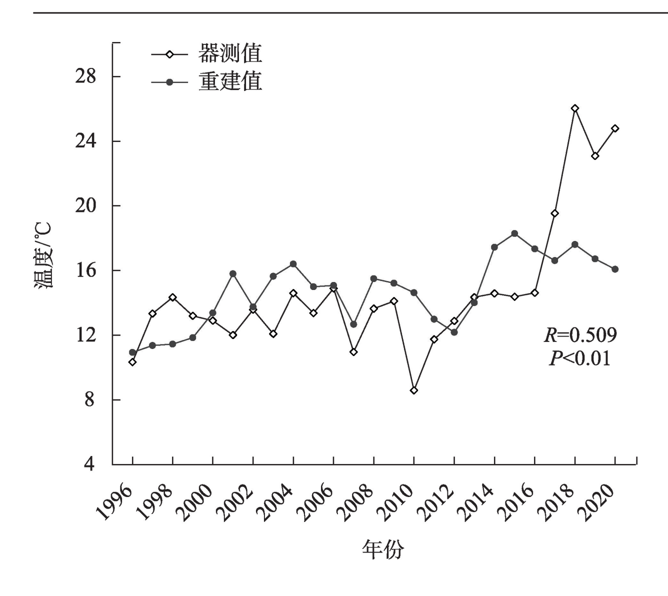


图5 管涔山地区3—4月平均最高气温重建值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between the reconstructed value of the mean maximum temperature from March to April and the measured value in Guancen Mountain area

为13 a，气温距平值为−0.437 ℃。对管涔山地区3—4月平均最高气温年代际变化特征分析可知，不同冷暖期呈波动变化特征，冷暖期交替分布。

2.5 重建气温序列周期变化特征

使用Morlet连续小波变换对气温重建序列进行周期分析，为减弱连续小波变换对始、末区域的边界效应，选择对称延伸法来减弱边界效应的影响[15,32]。由图7可知，管涔山地区近百年3—4月平均最高气温重建序列有明显的周期变化特征。在0~30 a主周期阶段内，3~5 a准周期变化存在于整个序列中；1970年之后，存在明显的10~13 a准周期变化特征。在30~60 a主周期阶段内，22~33 a和40~45 a准周期变化存在于整个序列中。

2.6 重建气温序列空间代表性分析

为进一步探究管涔山地区3—4月平均最高气温重建序列能否代表大范围的温度变化，本研究利

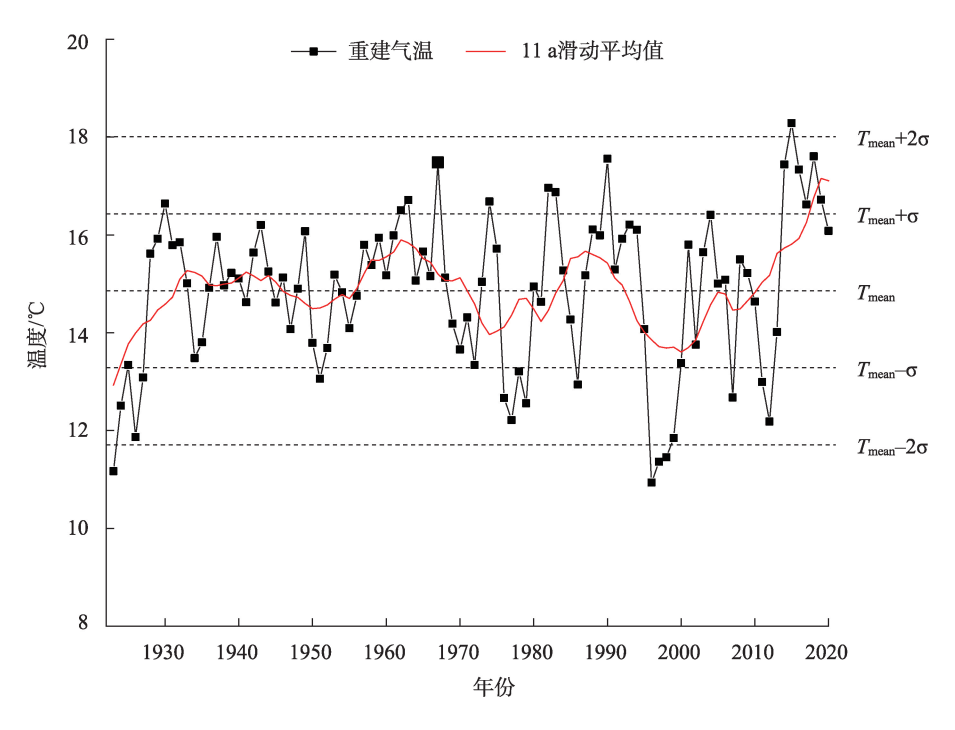


图6 管涔山地区3—4月平均最高气温重建序列及11 a滑动平均值

Fig. 6 The reconstruction sequence of the mean maximum temperature from March to April and the 11 year moving average value in Guancen Mountain area

表3 重建气温序列冷暖期划分

Tab. 3 Reconstructed temperature series division of cold and warm periods

暖期	年数/a	距平值/℃	冷期	年数/a	距平值/℃
1932—1945年	14	+0.249	1946—1956年	11	−0.169
1957—1970年	14	+0.589	1971—1983年	13	−0.437
			1993—2010年	18	−0.643

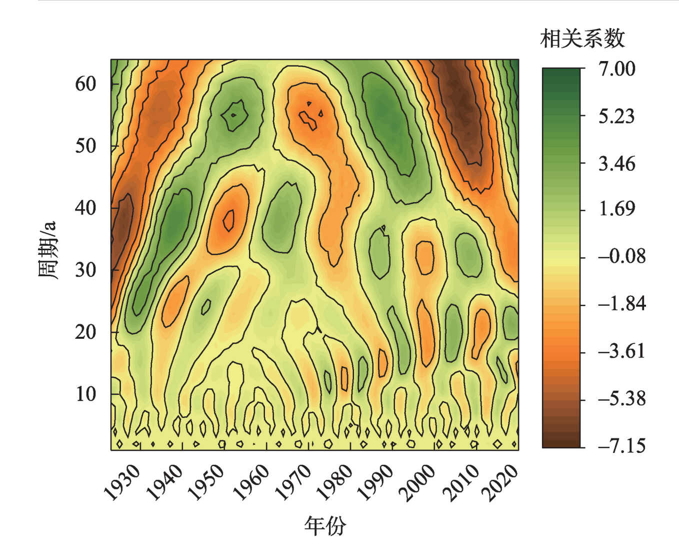


图7　管涔山地区3—4月平均最高气温重建序列的小波分析

Fig. 7　Wavelet analysis of reconstructed temperature sequence of the mean maximum temperature from March to April in Guancen Mountain area

用器测和重建气温资料分别与同时间段的气温格点数据(CRU TS 4.05, 0.5°×0.5°)做空间相关性分析(图8)。结果表明,器测与重建3—4月平均最高气温与格点数据空间相关模态基本一致,两者相关性最好的区域(R>0.4)均为山西北部地区。同时重建的管涔山地区3—4月平均最高气温序列也能够较好的代表俄罗斯中东部、日本北部、中国中东部等大范围地区的温度变化。通过对比器测和重建数据与气温格点数据的空间相关性分析可知,器测数据的空间代表性范围更大,相关程度更高,因此在未来该区域基于树轮宽度重建古气候的研究中,需要寻找年龄跨度更大,对气候更敏感的树轮宽度样本资料。

3　讨 论

3.1　管涔山华北落叶松径向生长对气候因子的响应

华北落叶松树轮宽度指数年表与3月降水量呈显著负相关关系,管涔山地区属于温带季风气候和温带大陆性气候过渡地带,3月雨季未来临,本身区域降水较少,但3月气温回暖速度较快,河流解冻以及当地地下水资源补充树木生长所需。早春树木生长发育需水量大,但存在阈值范围,过量的水分条件抑制树木光合作用和呼吸作用的进行,阻碍树木体内能量物质的传输[33]。树轮宽度指数年表与1月最高气温呈显著正相关关系,在冬季,呼吸作用是树木最主要的生理活动,温暖的冬季减少树木体内储存的碳水化合物的流失,更有利于下一年树木的生长发育;相反严寒的冬季,温度过低,对树木体内的植物组织和细胞造成永久性损伤,抑制树木生长发育[34]。树轮宽度指数年表与春季月份最高气温呈显著正相关关系,春季是树木生理活动和径向生长的旺盛时期,温度的升高,促进华北落叶松形成层活动的提早开始,同时加速积雪融化,利于当

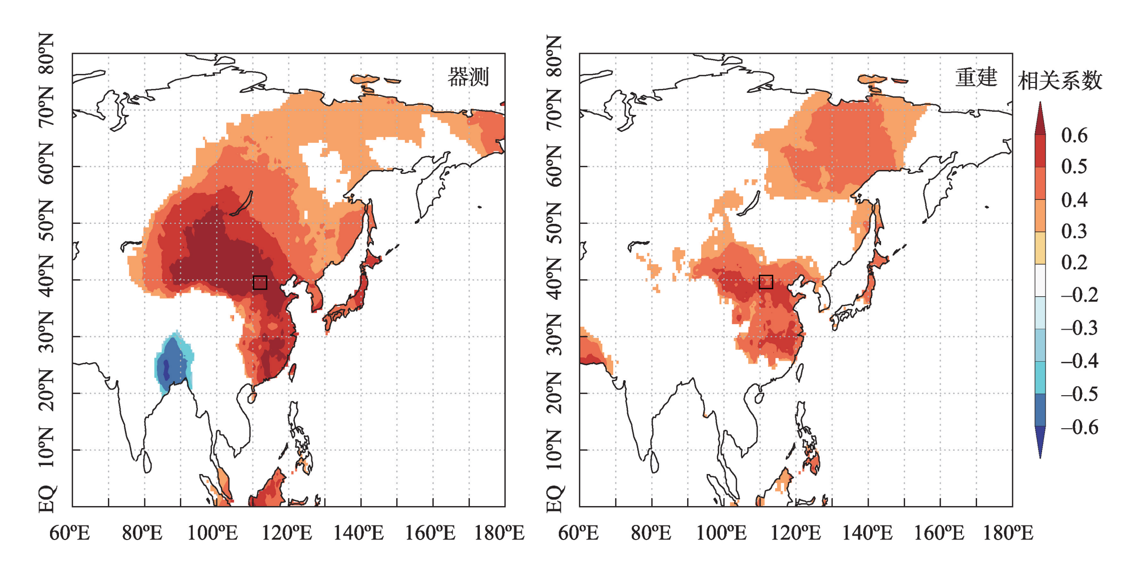


图8　管涔山地区1996—2020年3—4月平均最高气温器测数据和重建数据与CRU格点数据的空间相关分析

Fig. 8　Spatial correlation analysis of the measured and reconstructed data of the mean maximum temperature from March to April 1996 to 2020 and the CRU grid data in Guancen Mountain area

年树木生长发育，促进宽轮的形成[8,14-15,35]。同时张文涛等[36-37]在对芦芽山阳坡华北落叶松和白杄的研究中，均发现春季气温促进树木生长发育的结论，进一步验证本文研究结果的合理性。树轮宽度指数年表与6月最低气温呈显著正相关关系，6月为春夏交接的季节，气温波动幅度较大，保持树木生长底温的需要，对于维持轮宽的发育至关重要。树轮宽度指数年表与10月最高气温呈显著正相关关系，10月处于华北落叶松生长季末期，树木并未休眠，较高的温度延长树木生长季，利于光合作物的积累，对晚材发育起促进作用[38]。本文基于Pearson相关分析结果和树木生理学原理，选择对管涔山地区华北落叶松生长影响最为显著的3—4月平均最高气温气候因子进行近百年气温重建研究。

3.2 重建气温序列对比与分析

为了进一步验证管涔山地区近百年来3—4月平均最高气温重建结果的准确性和可靠性，将本文重建气温序列与陕西镇安县3—4月平均最高气温重建序列[39]、秦岭太白山3—6月平均气温重建序列[15]做对比分析（图9）。陕西镇安县重建气温序列1932—1937年与1941—1945年两个暖期和1953—1956年冷期与本文重建结果相一致；秦岭太白山重建气温序列1977—1983年和1993—1996年两个冷期与本文重建结果相一致。本文的寒冷年（1996—1998年）分布时间段与陕西镇安县和太白山研究结果基本相同。本文唯一的高温年为2015年，该年厄尔尼诺现象是有观测记录以来最强的3次厄尔尼诺现象之一，同时也是维持时间最长的厄尔尼诺过程，造成北方旱区伏秋旱严重，农业和畜牧业受到不同程度的影响[40-41]，进一步验证本文重建结果的合理性。本文气温重建结果与周边气温重建情形基本一致，说明在大范围空间尺度上，重建管涔山过去近百年3—4月平均最高气温变化有较好的代表性。

3.3 重建周期与内在驱动力

本文气温重建序列存在明显的3~5 a、10~13 a、22~33 a、40~45 a的准周期变化特征。厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-Southern Oscillation，ENSO）现象的周期为2~7 a，与本文3~5 a准周期变化相一致，说明ENSO现象对管涔山树木径向生长影响深远，该地区气温变化与大尺度海气间耦合振荡有关，ENSO是影响该区域气温变化的重要因素之一[42-43]。太阳黑子活动的周期在11 a左右，与本文10~13 a和11 a倍数的周期相一致，进一步说明太阳黑子活动对管涔山区域温度变化有重要影响[44]。在我国河南尧山[45]、新疆阿尔泰山[14]、湖北神农架地区[46]、秦岭太白山[15]、青海祁连山[16]、川滇横断山[19]和吉林长白山[47]气温重建过程中，均发现ENSO现象或者太阳黑子活动

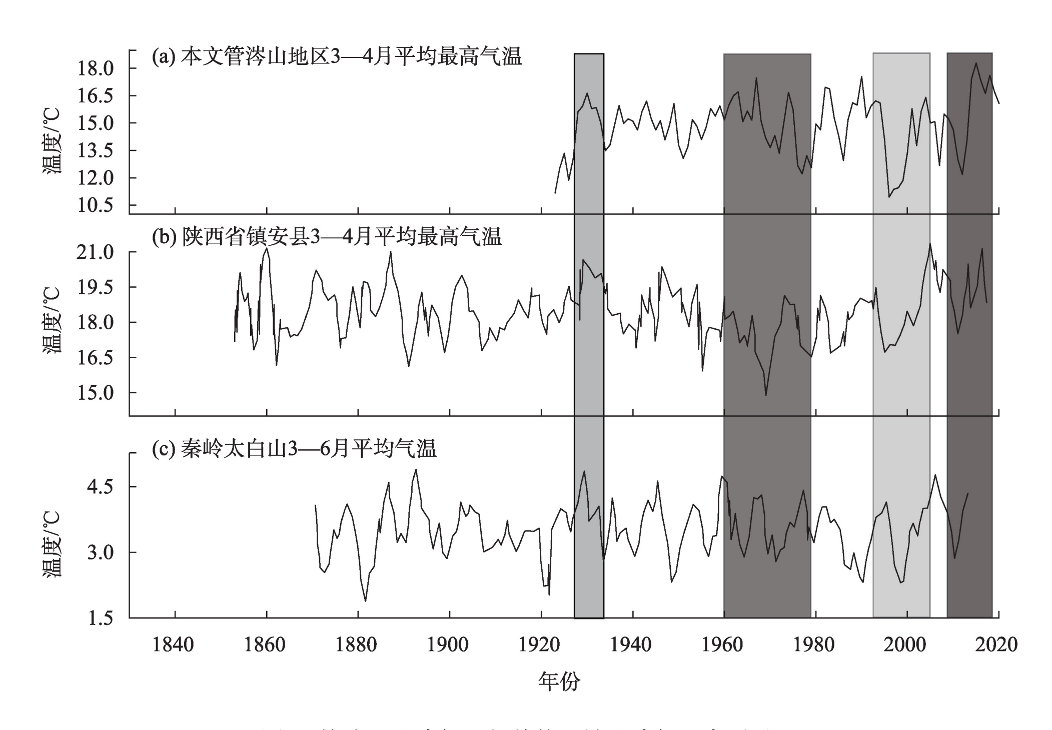


图9 管涔山重建气温与其他区域重建气温序列对比

Fig. 9 Comparison of the reconstructed temperature in Guancen Mountain and other regions

对温度变化影响深远。通过其他区域气温重建周期的认识,进一步说明本文重建气温中,周期存在的合理性,这些周期现象的存在,暗示管涔山地区与全球气候变化的内在关联,以及受到大范围气候变化的影响显著。

4 结 论

利用采样自吕梁山北段管涔山区的华北落叶松树轮宽度样芯资料,建立该区域树轮宽度指数标准年表,探讨树木径向生长与气候因子的相关关系,进而重建该区域近百年来3—4月平均最高气温的变化,经过对重建气温序列检验、冷暖期分期、周期分析和空间代表性分析,得到以下结论:

(1) 3—4月平均最高气温是限制管涔山地区华北落叶松径向生长最主要的气候因子。

(2) 重建结果可知,管涔山地区过去近百年有两个暖期和三个冷期分布,暖期为1932—1945年和1957—1970年;冷期为1946—1956年,1971—1983年和1993—2010年。

(3) 重建气温序列存在3~5 a、10~13 a、22~33 a、40~45 a的周期分布特征,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)现象和太阳黑子活动是其周期变化驱动因子。

(4) 重建气温序列对俄罗斯中东部、日本北部、中国中东部等大范围地区的温度变化具有很好的空间代表性。

参考文献(References):

[1] Visser P M, Verspagen J, Sandrini G, et al. How rising CO_2 and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms[J]. Harmful Algae, 2016, 54: 145-159.

[2] Piao S, He Y, Wang X, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(4): 641-651.

[3] Seager R, Cane M, Henderson N, et al. Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases[J]. Nature Climate Change, 2019, 9: 517-522.

[4] Chen F H, Ding L, Piao S L, et al. The Tibetan Plateau as the engine for Asian environmental change: the Tibetan Plateau Earth system research into a new era[J]. Science Bulletin, 2021, 66: 1263-1266.

[5] Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 data set[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126: e2019JD032361.

[6] Yang Y T, Mcvicar T R, Yang D W, et al. Low and contrasting impacts of vegetation CO_2 fertilization on global terrestrial runoff over 1982-2010: Accounting for aboveground and belowground vegetation CO_2 effects[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25: 3411-3427.

[7] 李江风, 袁玉江, 周文盛. 新疆年轮气候年轮水文研究[M]. 北京: 气象出版社, 1989. [Li Jiangfeng, Yuan Yujiang, Zhou Wensheng. A Study on the Climate and Annual Ring Hydrology of Xinjiang[M]. Beijing: Weather Press, 1989.]

[8] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990. [Wu Xiangding. Tree Rings and Climate Change[M]. Beijing: Weather Press, 1990.]

[9] Dinella A, Glammarchi F, Prendin A L, et al. Xylem traits of peatland Scots pines reveal a complex climatic signal: A study in the Eastern Italian Alps[J]. Dendrochronologia, 2021, 67, 125824.

[10] Gaire N P, Fan Z X, Shah S K, et al. Tree-ring record of winter temperature from Humla, Karnali, in central Himalaya: A 229 years long perspective for recent warming trend[J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 2020.

[11] Esper J, Hartl C, Tejedor E, et al. High-resolution temperature variability reconstructed from Black Pine Tree Ring densities in Southern Spain[J]. Atmosphere, 2020, 11(7): 11070748.

[12] Harley G L, Heeter K J, Maxwell J T, et al. Towards broad-scale temperature reconstructions for Eastern North America using blue light intensity from tree rings[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41: 3142-3159.

[13] Opala-owczarek M, Galstyan H, Owczarek P, et al. Dendrochronological potential of drought-Sensitive tree stands in Armenia for the hydroclimate reconstruction of the Lesser Caucasus[J]. Atmosphere, 2021, 12(2): 12020153.

[14] 焦亮, 马罗, 张同文, 等. 基于树轮记录的阿尔泰山中段1798年以来6—7月平均最低气温变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1944-1958. [Jiao Liang, Ma Luo, Zhang Tongwen, et al. Changes of mean minimum temperature in June-July since 1798 in central Altay Mountain recorded by tree rings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1944-1958.]

[15] 秦进, 白红英, 刘荣娟, 等. 近144年来秦岭太白山林线区3—6月平均气温的重建[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7585-7594. [Qin Jin, Bai Hongying, Liu Rongjuan, et al. Reconstruction of March-June mean air temperature along the timberline of Mount Taibai, Qinling Mountains, Northwest China, over the last 144 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7585-7594.]

[16] 张瑞波, 袁玉江, 喻树龙, 等. 树轮记录的青海过去300年5—6月平均最高气温时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7603-7613. [Zhang Ruibo, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. The spatio-temporal variability of May-June maximum temperature in past 300 years on the Qinghai Plateau, according to tree ring records

[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7603-7613.]

[17] 蔡秋芳, 刘禹. 过去百年河南桐柏山气温变化历史及其与海气相互作用的联系[J]. 第四纪研究, 2021, 41(2): 346-355. [Cai Qiufang, Liu Yu. Temperature variation of the past century in the Tongbai Mountain, Henan Province and its relationship with air-sea interaction[J]. Quaternary Sciences, 2021, 41(2): 346-355.]

[18] 蔡秋芳, 刘禹. 湖北麻城马尾松树轮宽度对气候的响应及1879年以来6—9月平均最高气温重建[J]. 科学通报, 2013, 58(增刊Ⅰ): 169-177. [Cai Qiufang, Liu Yu. The June-September maximum mean temperature reconstruction from Masson pine (*Pinus massoniana* Lamb.) tree rings in Macheng, southeast China since 1879 AD[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(Suppl. I): 169-177.]

[19] 谢成晟, 李景吉, 高苑苑, 等. 基于树轮宽度重建川西南137年秋冬季平均气温变化[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 252-263. [Xie Chengsheng, Li Jingji, Gao Yuanyuan, et al. Tree-ring width based autumn and winter mean temperature reconstruction and its variation over the past 137 years in Southwestern Sichuan Province [J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(1): 252-263.]

[20] 蔡秋芳, 刘禹, 包光, 等. 树轮记录的吕梁山地区公元1836年以来5—7月平均气温变化[J]. 科学通报, 2010, 55(20): 2033-2039. [Cai Qiufang, Liu Yu, Bao Guang, et al. Tree-ring-based May-July mean temperature history for Lüliang Mountains, China, since 1836[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(20): 2033-2039.]

[21] 王振威, 李强, 刘禹, 等. 树轮记录的吕梁山北部过去175年来帕尔默干旱指数变化[J]. 地球环境学报, 2020, 11(1): 72 - 80. [Wang Zhenwei, Li Qiang, Liu Yu, et al. PDSI variations recorded by tree rings in the northern Lüliang Mountains during the past 175 years[J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(1): 72- 80.]

[22] 李强, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 山西宁武地区1686年以来年降水重建[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 999-1006. [Li Qiang, Liu Yu, Cai Qiufang, et al. Reconstruction of annual precipitation since 1686 A. D. from Ningwu region, Shanxi Province[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 999-1006.]

[23] 马丽. 管涔山生物多样性特征研究[J]. 山西林业科技, 2014, 43(3): 19-21. [Ma Li. Study on biodiversity characteristic in Guancen Mountain[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2014, 43(3): 19-21.]

[24] 郝晓鹏, 上官铁梁, 邱文. 汾河源头管涔山森林群落植物物种多样性研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(13): 6232-6235. [Hao Xiaopeng, Shangguan Tieliang, Qiu Wen. Plant species diversity of the forestry community in Guancen Mountain at the source of Fen River of Shanxi[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2009, 37(13): 6232-6235.]

[25] 王嘉川, 李书恒, 郭伊利, 等. 管涔山华北落叶松径向生长对温度变化的动态响应[J/OL]. 生态学杂志, 2022: 1-13. [2022-10-06]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220930.1612.012.html. [Wang Jiachuan, Li Shuheng, Guo Yili, et al. Dynamic response to climate change in the radial growth of *Larix principis-rupprechtii* on Guancen Mountain[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 2022: 1- 13. [2022- 10- 06]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220930.1612.012.html.]

[26] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-ring Dating[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.

[27] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. Tree-ring Bulletin, 1983, 43: 69-75.

[28] Holmes R L, Adams R K, Fritts H C, et al. Tree-ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin. Chronology Series VI[M]. Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, 1986: 50-60.

[29] Shekhar M, Pal A K, Bhattacharyya A, et al. Tree-ring based reconstruction of winter drought since 1767 CE from Uttarkashi, Western Himalaya[J]. Quaternary International, 2017, 479: 58-69.

[30] 崔宇, 胡列群, 袁玉江, 等. 树轮记录的过去359 a阿勒泰地区初夏气温变化[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(5): 22-28. [Cui Yu, Hu Liequn, Yuan Yujiang, et al. Early summer temperature change in Altay over the past 359 years recorded by tree rings[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(5): 22-28.]

[31] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(2): 201-213.

[32] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 1- 174. [Lin Zhenshan, Deng Ziwang. Research on Wavelet Climate Diagnosis Technology[M]. Beijing: Weather Press, 1999: 1-174.]

[33] 周子建, 江源, 董满宇, 等. 长白山北坡不同海拔红松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4668-4676. [Zhou Zijian, Jiang Yuan, Dong Manyu, et al. Response of the relationship between radial growth and climatic factors to abrupt change of temperature along an altitudinal gradient on the northern slope of Changbai Mountain, Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4668-4676.]

[34] 白天军, 邓文平, 旷远文, 等. 庐山不同海拔日本柳杉年轮宽度对气候因子的响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 57-66. [Bai Tianjun, Deng Wenping, Kuang Yuanwen, et al. Response of tree ring width in *Cryptomeria japonica* to climatic factors at different elevations in Lushan Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 57-66.]

[35] 郭伊利, 李书恒, 王嘉川, 等. 芦芽山华北落叶松早晚材径向生长对气候变化响应的分离效应[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1449- 1463. [Guo Yili, Li Shuheng, Wang Jiachuan, et al. Response divergence of radial growth to climate change in earlywood and latewood of *Larix principis-rupprechtii* in Luya Mountain[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1449-1463.]

[36] 张文涛, 江源, 王明昌, 等. 芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径

向生长对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6481-6488. [Zhang Wentao, Jiang Yuan, Wang Mingchang, et al. Responses of radial growth in *Larix principis-rupprechtii* to climate change along an elevation gradient on the southern slope of Luya Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6481-6488.]

[37] 张文涛, 江源, 王明昌, 等. 芦芽山阳坡不同海拔白杆径向生长对气候变暖的响应[J]. 植物生态学报, 2013, 37(12): 1142-1152. [Zhang Wentao, Jiang Yuan, Wang Mingchang, et al. Responses of radial growth to climate warming in *Picea meyeri* trees growing at different elevations on the southern slope of Luya Mountain[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(12): 1142-1152.]

[38] 杨绕琼, 范泽鑫, 李宗善, 等. 滇西北玉龙雪山不同海拔云南松(*Pinus yunnanensis*)径向生长对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8983-8991. [Yang Raoqiong, Fan Zexin, Li Zongshan, et al. Radial growth of *Pinus yunnanensis* at different elevations and their responses to climatic factors in the Yulong Snow Mountain, Northwest Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8983-8991.]

[39] 华亚伟, 张红娟, 刘康. 基于油松树轮重建陕西省镇安县165年以来3—4月平均最高气温[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 381-387. [Hua Yawei, Zhang Hongjuan, Liu Kang. Reconstruction of the March-April average maximum air temperature over 165 years based on *Pinus tabuliformis* tree-rings of Zhen'an County, Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 381-387.]

[40] 翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等. 2015—2016年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报, 2016, 74(3): 309-321. [Zhai Panmao, Yu Rong, Guo Yanjun, et al. The strong El Nino in 2015-2016 and its dominant impacts on global and China's climate[J]. Acta Meteorological Sinica, 2016, 74(3): 309-321.]

[41] 王闪闪, 王素萍, 冯建英. 2015年全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 382-389. [Wang Shanshan, Wang Suping, Feng Jianying. Drought events and its influence in 2015 in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(2): 382-389.]

[42] 方克艳, 周非飞, 董志鹏, 等. 器测和树轮资料对厄尔尼诺—南方涛动指数的响应特征[J]. 第四纪研究, 2017, 37(5): 1064-1076. [Fang Keyan, Zhou Feifei, Dong Zhipeng, et al. Response characteristics of instrumental and tree-ring data to El Niño-Southern Oscillation Index[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(5): 1064-1076.]

[43] Mcphade M J, Zebiak S E, Glantz M H. ENSO as an integrating concept in Earth science[J]. Science, 2006, 314: 1740-1745.

[44] 周群, 陈文. 太阳活动11年周期变化对南海夏季风爆发的可能影响[J]. 热带气象学报, 2020, 36(1): 25-31. [Zhou Qun, Chen Wen. Possbile influences of the solar cycle on the onset of South China Sea Summer Monsoon[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2020, 36(1): 25-31.]

[45] 杨柳, 李静茹, 彭剑峰, 等. 1801年以来河南尧山地区油松高温变化及影响机制[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 79-91. [Yang Liu, Li Jingru, Peng Jianfeng, et al. Temperature variation and influence mechanism of *Pinus tabulaeformis* ring width recorded since 1801 at Yao Mountain, He'nan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 79-91.]

[46] 郑泽煜, 靳立亚, 李金建, 等. 树轮记录的1808年以来神农架地区平均气温的变化[J]. 第四纪研究, 2021, 41(2): 334-345. [Zheng Zeyu, Jin Liya, Li Jinjian, et al. Variability of mean temperature since 1808 A. D. in Shennongjia Mountain area inferred from tree ring[J]. Quaternary Sciences, 2021, 41(2): 334-345.]

[47] 王蔚蔚, 张军辉, 戴冠华, 等. 利用树木年轮宽度资料重建长白山地区过去240年秋季气温的变化[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4): 787-793. [Wang Weiwei, Zhang Junhui, Dai Guanhua, et al. Variation of autumn temperature over the past 240 years in Changbai Mountains of Northeast China: A reconstruction with tree-ring records[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(4): 787-793.]

Variation of mean maximum temperature from March to April since 1923 in the northern section of Lvliang Mountain recorded by tree rings

WANG Jiachuan[1,2], LI Shuheng[1,2], GUO Yili[1,2], HAN Yijie[1,2], MAO Zhonglei[1,2]

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: With the established standard chronology of the tree-ring width of *Larix principis-rupprechtii* in the Guancen Mountain in the northern section of Lvliang Mountain as basis, Pearson correlation analysis concluded that the average maximum temperature from March to April was the main controlling climate factor for the radial growth of trees in the study area ($R = 0.509$, $P < 0.05$). First-order linear regression equation was used to simulate and construct the change process of the average maximum temperature in the Guancen Mountains from March to April in the past nearly a century. The reconstructed equation was then cross-checked by the elimination method of leave-one-out test to verify its stability and reliability. Analysis of the temperature changes of the reconstructed temperature series showed that two warm periods and three cold periods in the past nearly a century in the Guancen Mountain area; the warm periods were 1932–1945 and 1957–1970, and the cold periods were 1946–1956, 1971–1983, and 1993–2010. Periodic analysis of the reconstructed temperature series based on Morlet wavelet analysis revealed periodic distribution characteristics of 3~5 a, 10~13 a, 22~33 a, and 40~45 a. El Niño-Southern Oscillation and sunspot activity were the drivers of this periodic variation. Large-scale spatial correlation analysis indicated that the reconstructed temperature series had a good spatial representation of temperature changes in large-scale regions such as central and eastern Russia, northern Japan, and central and eastern China. These results have important reference value for forest management and agriculture and animal husbandry development in Guancen Mountain area.

Keywords: *Larix principis-rupprechtii*; tree-ring width; mean maximum temperature reconstruction; Guancen Mountain